



# 熱帯モンスーン域における表層崩壊ハザード評価とその将来展望

著者	小野 桂介
号	58
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第004966号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/58932">http://hdl.handle.net/10097/58932</a>

氏名	おの けいすけ 小野 桂介		
授与学位	博士 (工学)		
学位授与年月日	平成26年3月26日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻		
学位論文題目	熱帯モンスーン域における表層崩壊ハザード評価とその将来展望		
指導教員	東北大学教授 風間 聡		
論文審査委員	主査 東北大学教授 風間 聡	東北大学教授 越村 俊一	
	東北大学教授 田中 仁	東北大学准教授 小森 大輔	

## 論文内容要旨

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) によると, 降雨観測記録において豪雨の強度と頻度の世界的な増加傾向が示され, 今後の将来もこの増加傾向は変わらない可能性が高い. 降雨の頻度と量の変化に伴い, 特に中進国・途上国において水関連災害の頻発と強度の増加が懸念される. 水関連災害の一つである土砂災害により世界中において毎年多くの被害が生じている. 東南アジア域のような豪雨頻発地域においては土砂崩壊の多くが表層崩壊の形態をとるため, 土砂災害に対する防災および減災に向けて表層崩壊発生危険度の空間分布の推定が重要である. 表層崩壊の危険度評価においては現象のメカニズムに基づく動的な解析が可能である力学モデルを用いる手法が理想的である. 表層崩壊の誘因となる降雨データに関しては観測密度の小さい地域も多く, 崩壊危険度の明示に必要な豪雨分布推定に向けて地上観測雨量の代替データとなる降水量データの利用が必要である. また, 気候変動に伴う降水変化により土砂災害が深刻化する可能性が高く, 事前に気候変動の影響を把握し対策を講じることが必要である. 近年, 環境データの少ない地域にも適用可能な力学的表層崩壊モデルが開発されつつあるが, 東南アジア域におけるモデルの適用性評価は十分に実施されていない. また, 豪雨分布推定における日降水グリッドデータの利用可能性が示唆されているが, 東南アジア域において日降水グリッドデータを用いた豪雨の推定手法に関する研究はほとんど存在しない. 加えて, 降雨将来予測値を用いた気候変動影響評価の実施が推奨されている. 本研究では, 力学的な表層崩壊モデルと日降水グリッドデータ, 降雨将来予測値を組み合わせた手法により, 東南アジア域の表層崩壊危険度分布およびその将来展望を明示した. また, 気候変動及び土砂災害に関する地域性と表層崩壊危険度の将来変化の結果を基に, 地域スケールにおける土砂災害に対する脆弱性を評価した.

熱帯モンスーン気候に属するタイにおいて過去に生じた表層崩壊事例に簡便な力学的表層崩壊モデルである Shallow Landslide Instability Prediction (SLIP) モデルを適用し, 東南アジア域へのモデルの適用可能性を評価した. 空間解像度, 降雨分布, 表土層厚が力学的表層崩壊モデルの推定結果に与える影響を評価した. 統計的手法と力学的手法によるハザードマップを比較および考察した. なお, ハザードマップの精度評価に Receiver Operating Characteristic プロットから導かれる Area-Under-Curve (AUC) を用いた. ペチャブーン領域における解析の結果, 領域平均雨量を用いた場合, ナムコヤイ支流の北部および西部, 中央部, 東部の急斜面が安全率 0.8 以下の最も大きな表層崩壊ハザードを示し, 西部において表層崩壊ハザードと崩壊実績は良好な相関を示した. 同時に, ハザードマップの全体的な過大推定傾向が示された. 空間分布雨量を用いた場合, ナムコヤイ支流の南西部が安全率 0.8 以下の最も大きな表層崩壊ハザードを示し, 西部において表層崩壊ハザードと崩壊実績は良好な相関を示した. 同時に, 空間分布雨量の利用によりハザードマップの全体的な過大推定傾向は緩和され

た。AUCは空間分布雨量を用いた解像度 90m において最大値 0.883, 領域平均雨量を用いた解像度 30m において最小値 0.770 を示した。全体の傾向として AUCは空間分布雨量を用いる場合および粗解像度を用いる場合に良好な値を示した。ハザードマップにおいて解像度が大きいほど危険の中と見逃しが減少し, 安全の中と空振りが増加する傾向を確認した。また, 空間分布雨量の利用により危険の中・安全の中が増加し, 空振り・見逃しが減少する傾向を確認した。安全率 1 を安定・不安定斜面を判別する閾値とする場合, 空間分布雨量を用いた解像度 90m においてハザードマップの精度は最大値を示し, 崩壊地に関するプロデューサ精度は 88.5%を示した。統計手法の一つであるロジスティックモデルと SLIP モデルによるハザードマップにおける AUCは 0.800 と 0.883 であり, SLIP モデルが崩壊地および非崩壊地に関する高い中率を示した。

Asian Precipitation—Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources プロジェクトによる日降水量グリッドデータ (以後, APHRODITE プロダクトと呼ぶ) を用いた豪雨分布の推定手法を提案した。同時に, 豪雨に関する APHRODITE プロダクトのバイアスおよび標高補正手法を示した。東南アジアに位置するラオスとベトナムにおいて, 豪雨推定手法の適用性を評価および検証した。結果として, タイ, ラオス, ベトナムにおいて, 地上観測雨量による 5 年降雨極値と比べて APHRODITE プロダクトの 5 年降雨極値は 33%から 38%小さい値を示した。また, APHRODITE プロダクトの推定値の過小傾向は対象領域で均一に生じていた。タイにおいて, 5 年降雨極値が標高と正の相関を持つことが示された。つまり, 標高が高いほど 5 年降雨極値が増加する傾向が示された。タイ全土の 5 年降雨極値の分布において, 降雨の標高依存性を考慮したことによりマレー半島やタイ北部の山地における多雨の傾向が認められた。例えば, マレー半島東部の山地は最も降雨量が大きく, 300mm 以上の値を示した。また, 特に標高が高い山脈が連なるタイ北部の山岳部において 200mm 以上の値が認められた。バイアスおよび標高補正により, APHRODITE プロダクトによる 5 年降雨極値がメーチャム流域の雨量計による 5 年降雨極値に近づくこと, また, その傾向が標高の高い観測点において顕著であることが示された。同時に, バイアスおよび標高補正により, APHRODITE プロダクトによる 5 年降雨極値がラオスとベトナムの雨量計による 5 年降雨極値に近づくことが示された。

大気大循環モデル (GCM) による降雨将来予測値と SLIP モデルを組み合わせた手法により, タイのペチャブン領域 (小領域) とチャオプラヤ領域 (大領域) における表層崩壊ハザードの将来展望を示した。対象期間を現在気候 (1980 年から 2011 年)・中間気候 (2040 年から 2059 年)・将来気候 (2080 年から 2099 年) の三期間, 対象 GCM を MIROC5・GFDL-ESM2M・CanESM2・CSIRO-Mk3.6.0・INM-CM4・CNRM-CM5 の六種類とした。ペチャブン領域における解析の結果, 安全率 1 以下となるグリッドの年発生数 (不安定グリッド数) に関して, 将来における増加傾向が示された。また, MIROC5 を除き, 中間気候よりも将来気候において不安定グリッド数が大きな増加率を示した。増加率は CanESM2 および GFDL-ESM2M において最大であり, 中間気候で 60%, 将来気候で 80%以上増加した。GCM による結果を平均すると, 不安定グリッド数は中間気候で 39%, 将来気候で 49%増加した。また, 将来において発生グリッド数が雨期終盤 (10 月, 11 月) に急増し, 月平均で現在気候に比べて約 200 グリッドから 400 グリッド増加する可能性が示された。領域内で不安定グリッドが一つ以上存在する日の年発生数 (不安定日数) に関して, 将来における不安定日数の増加傾向が示された。また MIROC5 と INM-CM4 を除き, 中間気候よりも将来気候において不安定日数が大きな増加率を示した。増加率は GFDL-ESM2M において最大であり, 中間気候で 45%, 将来気候で 59%増加した。GCM による結果を平均すると, 不安定日数は中間気候で 31%, 将来気候で 34%増加した。また, 不安定日数は 9 月と 10 月に急増する可能性が示された。各グリッドにおいて安全率 1 以下となる日の年発生頻度 (不安定化頻度) に関して, 現在気候においては北部が 4 日から 5 日を示し, 最も多い不安定化頻度を示した。GCM による結果を平均すると, 中間気候においては北部, 西部, 東部の山岳地域で発生頻度が 1 日から 1.4 日程度増加した。将来気候においてはこれら領域において発生頻度が 1.6 日から 2.0 日程度増加した。チャオプラヤ領域における解析の結果, 5 年降雨極値の発生に伴う安全率の分布に関して, 中間気候と将来気候においてチャオプラヤ流域の上中流域の斜面部で 10%から 20%の安全率の減少が予測された。特に中央部の広域において安全率が 20%から 30%減

少した。安全率の県毎の変化に関して、現在気候から中間気候にかけて、プレー県において安全率が15%から20%程度減少すると予測された。また、ランブーン県、ランパーン県、ウタラディット県、ピサヌローク県、サラブリー県において安全率が10%から15%程度減少した。また、中間気候から将来気候にかけてチェンマイ県、ランブーン県、ウタラディット県、スコタイ県において安全率が5%程度減少すると予測された。

タイ北部に位置するヤンルアン村において現地視察および社会科学的手法の一つである統計的社会調査を実施することにより、地域の基本情報、気候変動に関する認識、土砂災害に関する認識や応答、現行の対策、将来の対策における要望などを理解した。調査結果と表層崩壊ハザードの将来変化を基に、地域レベルにおいて土砂災害に対する脆弱性を評価した。最後にハザードマップの活用方法を提案および検討した。現地視察により収集した情報（村長による情報、村人による情報、土砂災害関連文献による情報）とアンケート調査により収集した情報（地域の基本情報、気候変動への認知、土砂災害への認知）に関して、気候外力・感受性・適応能力に注目して結果を整理した。ヤンルアン村における結果として、気候外力が大きいこと、気候変動影響に対する感受性が高いこと、気候変動影響に対する適応能力が低いことが認められ、中長期的な視点から土砂災害ハザードおよびリスクの増加が予想された。脆弱性評価の結果、感受性と適応能力の将来変化を考慮しない場合、土砂災害に対する脆弱性指標は現在気候において0.48、中間気候において0.52、将来気候において0.53を示した。また、適応能力の将来変化を考慮する場合、土砂災害に対する脆弱性指標は現在気候において0.48、中間気候において0.46、将来気候において0.43を示した。これらの値は脆弱性の分類において *High* に属し、この地域が土砂災害に対して脆弱な地域であることを示唆した。

# 論文審査結果の要旨

熱帯モンスーンの地域は雨期に多量の雨が集中するため、同地域の途上国は斜面災害リスクにさらされており、精度良いハザードマップの提供は急務である。また、気候変動に伴う将来展望を示すことは危急の課題といえる。本論文は、斜面崩壊の力学的モデルを構築し、気候モデルとの組み合わせから現在、将来の斜面災害のハザードマップを精度よく推定する手法を開発した。

論文は全6章よりなる。

第1章は序論であり、既往研究から本論文の位置づけと独自性を記述し、土砂災害を分類し、研究対象を表層崩壊に特定している。

第2章は、開発した表層崩壊を表現する力学的モデルについて説明している。本モデルは、タイ国のペチャブンとウトラディットの2つの地域で解析された。また、同時にモデル評価手法を提案し、より多面的なモデル評価を行った。さらに途上国で良く用いられる確率モデルとの比較を行い、開発したモデルの優位性を示した。開発したモデルは広域の斜面災害を精度よく評価できる防災上、有用かつ重要な成果である。

第3章では、斜面災害のハザードの入力データとして重要な豪雨の時空間分布データの解析を行っている。タイ国において広域雨量データセットを用いて、極値データの推定、空間分布推定、豪雨の高度依存性の推定を行い、ラオスとベトナムにおいて推定手法を検証し、精度よい豪雨時空間データの提供が可能となった。この結果は、斜面災害だけでなく、豪雨災害一般に利用できる、工学的に極めて重要な成果である。

第4章では、力学的表層崩壊モデルと気候モデルの出力値を用いて、異なるスケールのペチャブン地域とチャオプラヤ川流域の表層崩壊ハザードの将来展望を示した。複数の気候モデルによって中間気候と将来気候のハザードを推定し、危険地域を抽出すると同時に、その不確実性を議論した。本成果は、熱帯モンスーン地域の斜面ハザードの将来展望を世界で初めて示した貴重な成果である。

第5章は、タイ国の斜面災害が発生した村落において、住民インタビューを実施し、気候変動及び土砂災害に関する地域性と住民特性について解析した。地域の脆弱性評価手法を示し、その結果に基づいて有効な適応策を提示した。これらの成果は、社会科学的要素も加わった工学的に極めて重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、表層崩壊ハザードを精度よく推定する手法を提案し、将来のハザードを推定することに成功した。この結果、熱帯モンスーン地域の将来の斜面災害ハザードを初めて提供した本研究の成果は、気候変動により影響を受ける途上国の開発政策に大きく貢献できるものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。